



Arbeitstitel – Forum für Leipziger Promovierende // Gegründet 2009
Herausgegeben von Stephanie Garling, Susanne Bunzel, Franziska Naether,
Christian Fröhlich, Felix Frey
Meine Verlag, Magdeburg

Ein Blick in das Innere antiker römischer Kupfermünzen. Ein Analyse mittels 3D-Röntgencomputertomographie

Gerald Eisenblätter

Zitationsvorschlag: Gerald Eisenblätter: Ein Blick in das Innere antiker römischer Kupfermünzen. Ein Analyse mittels 3D-Röntgencomputertomographie. In: Arbeitstitel – Forum für Leipziger Promovierende Bd 5, Heft 1 (2013). S. 30–37.

urn:nbn:de:bsz:15-qucosa2-170010

Abstract*– deutsch –*

Der Fokus der Untersuchungen liegt auf Kupfermünzen des alten Roms. Als analytische Methode wird die 3D-Röntgen-computertomographie (3D- μ XRCT) herangezogen, welche in Kombination mit oberflächensensitiven Analyseverfahren ein abgerundetes Bild von Objekten verschafft. Die 3D- μ XRCT ermöglicht einen Einblick in das Innere der Münzen, um beispielsweise Zinkverarmungen und innere Korrosion sowie Hohlräume zu beobachten. Darüber hinaus ist die 3D- μ XRCT geeignet, unbekannte Objekte so zu visualisieren, um eine Identifikation vernehmen zu können.

– englisch –

The described investigations were done on copper coins of ancient Rome. Mainly 3D X-ray computed tomography (3D- μ XRCT) was used and seems to be a suitable analytical method which provides in combination with surface-sensitive analysis a complete view of the object. The 3D- μ XRCT provides insights into the interior of the coins to observe, for example, zinc depletion, internal corrosion and pore formation. Moreover, visualizing unknown objects by 3D- μ XRCT facilitates or enables their identification.

1. Einführung

Die Signifikanz von Metallen wird unter anderem in der Bezeichnung ganzer Epochen wie Kupfer-, Bronze- oder Eisenzeit deutlich. Seit 200 Jahren werden naturwissenschaftliche Methoden zur Beantwortung kulturhistorischer Fragestellungen herangezogen. Antike Münzen und weitere Metallobjekte stellen hierbei eine wesentliche Materialgruppe dar. Gegenstand der hier vorgestellten archäometrischen Untersuchungen sind Kupfermünzen der julisch-claudischen Dynastie, welche 68 n. Chr. endete. Sie sind Bestandteil der Sondersammlungen der Universitätsbibliothek Leipzig bzw. des Herzog Anton Ulrich-Museums in Braunschweig.

M. H. Klaproth legte mit seinen Untersuchungen an antiken Münzen und Metallobjekte im Jahre 1815 den Grundstein für quantitative Analysen. Diese archäometrische Pionierleistung wurde erst im nächsten Jahrhundert durch E. R. Caley (1949) gewürdigt, wobei zugleich mit moderneren Analysemethoden die Ergebnisse von Klaproth bestätigt wurden. Ebenso wird deutlich, dass mit der Weiterentwicklung des Methodenspektrums sowie dem Erreichen niedrigerer Nachweisgrenzen, bestehende Analysen einer Revision unterzogen werden müssen. Insbesondere im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden mehrere Serienanalysen mit einer Vielzahl an Metallobjekten initiiert. Rehren und Pernicka (2008: 233) zeigen, dass Metallobjekte seit mehr als 10.000 Jahren eine signifikante Rolle in der Menschheitsgeschichte spielen. Oft befasst sich die Archäometallurgie mit den sieben bereits in der Antike bekannten Metallen und zugehörigen Legierungen (Gold, Kupfer, Blei, Silber, Zinn, Eisen und Quecksilber). Ziele der Metalluntersuchungen können „Frage[n] nach der Herkunft von Metallen und ihrer Verbreitung durch Handel und Warentausch [...] [oder] nach Herstellungstechniken“ (Hauptmann 2008: 125) sein. Darüber hinaus besteht ein Interesse, Fragen zur Korrosion sowie Konservierung oder zur Echtheit zu klären. Aus technisch-

materialwissenschaftlicher Perspektive spielt die Methodenetablierung und -weiterentwicklung eine bedeutende Rolle. Insgesamt betrachtet, kann heutzutage auf ein breites Methodenspektrum zur Analyse zurückgegriffen werden, wobei hier in „zerstörungsfreie physikalische Analysemethoden [...] und zerstörende Mikroanalysemethoden“ (Trojanowicz 2008: 915) unterschieden wird.

Mit der Röntgencomputertomographie (3D- μ XRCT) steht eine zerstörungsfreie bildgebende Technik bereit, die u. a. in der Medizin, Industrie oder Materialwissenschaft, aber auch beim Erhalt des Kulturerbes zum Einsatz kommt. Arbeiten von van der Linden u. a. (2010), Hess u. a. (2011) und Young (2012) zeigen beispielsweise den Einsatz und Nutzen von Computertomographie, u. a. auch in Hinblick auf den Einsatz von Röntgen-, Neutronen- und Synchrotronstrahlung im Vergleich, auf. Demnach ist die Röntgencomputertomographie eine nicht-invasive Methode, die auf Grund von Dichteunterschieden Informationen über das Innere von Objekten gibt. Mit ihr kann im wahrsten Sinne „*Verborgenes Wissen*“ offen gelegt werden.

2. Funktionsweise der Röntgencomputertomographie

„Computertomographie basiert auf der Abschwächung polychromatischer Röntgenstrahlung bei Durchdringung eines Objektes. Bestimmt wird der lineare Schwächungskoeffizient μ , der sich als Funktion der Position im Raum, der Dichte und der verwendeten Röntgenenergie darstellt. Das Prinzip besteht darin, [vom zu untersuchenden Objekt] eine Vielzahl von Projektionen unter verschiedenen Winkeln aufzunehmen. Aus diesen Projektionen kann durch Rücktransformation ein virtuelles Volumenbild rekonstruiert werden“ (Franz et al. 2010).

Der schematische Aufbau des am Institut für Mineralogie, Kristallographie und Materialwissenschaft der Universität Leipzig installierten Röntgencomputertomographen, welcher vom Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Dresden entwickelt wurde, ist Abbildung 1 zu entnehmen.

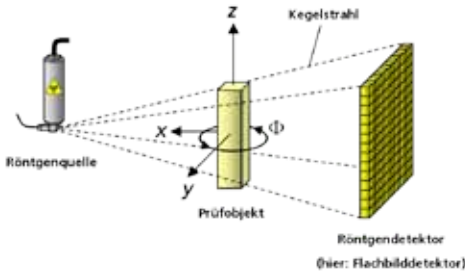


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Röntgencomputertomographie-Aufbaus. (Abbildung nach Torsten Brandmüller, Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik)

Entsprechend gilt nach Objektdurchtritt für den abgeschwächten Strahl mit der Intensität I (siehe Kalender 2006: 25):

$$I = \int_0^{E_{\max}} I_0(E) \cdot e^{-\int_0^d \mu ds} dE$$

als Erweiterung des Lambert-Beer'schen-Gesetzes für polychromatische Strahlung und unterschiedliche Materialien mit d = Durchstrahlungslänge, μ = Schwächungskoeffizient, I_0 = Intensität des ungebeugten Röntgenstrahls. Daraus ableitend, ergibt sich eine Verschiebung des Energiespektrums, welche zur sogenannten Strahlaufhärtung führt. Zur Reduktion dieser wurde nach der Röntgenquelle ein Filter aus Kupferblech in den Strahlengang eingebracht.

Mit der Röntgencomputertomographie werden am Beispiel der antiken römischen Kupfermünzen Möglichkeiten eröffnet, über die Verteilung von Grauwerten im Volumen Aussagen zur integralen Dichteverteilung zu treffen. Darüber hinaus können Volumeninhomogenitäten registriert werden, die Rückschlüsse auf den Korrosionszustand und -prozess erlauben.

3. Historische Einordnung der Kupferprägung im alten Rom

Erst in der Mitte des 2. Jh. v. Chr. stieg die römische Münze zur Weltwährung auf. Zuvor entwickelte sich aus dem *aes rude*¹ zunächst das *aes signatum*² und schließlich das *aes grave*³. Die im Umlauf befindliche Währung gewann zunehmend an Bedeutung, da mittels Bild und Legende Möglichkeiten zum Treffen von Aussagen im ganzen Reichsgebiet eröffnet wurden. In der augusteischen Zeit bildete sich das stabile Geldsystem der frühen Kaiserzeit aus, das alle drei Metallsorten umfasst. Folgendes Schema liegt diesem Geldsystem zu Grunde (vgl. Christ 1967):

1 Aureus [Gold] entsprach 25 Denaren [Silber]

1 Denar entsprach 4 Sesterzen [Messing]

1 Sesterz (25 g) entsprach 2 Dupondien [Bronze, später Messing]

1 Dupondius (12,5 g) entsprach 2 Assen [Kupfer]

1 As (11 g) entsprach 2 Semis [Kupfer/Bronze]

1 Semis (3 g) entsprach 2 Quadranten [Kupfer].

Die Münzreform unter Kaiser Augustus hatte die Wiederherstellung der römischen Bronzeprägung zur Folge. Mit dieser Reform wurden Sesterz und Dupondius aus Aurichalcum geschlagen. Aurichalcum, eine Messinglegierung, wurde für wertvoller als Kupfer und Bronzelegierungen gehalten (Radnoti-Alföldi 1978; Kent 1973).

„[Die kaiserliche Münzprägung] unterstand dem a rationibus, dem Ressortleiter der gesamten kaiserlichen Finanzverwaltung, die römische

1 vorgewogene Kupferbrocken

2 gegossene und mit Motiven sowie Wertzeichen versehene Kupferbarren

3 schweres gegossenes Kupfergeld

Münzstätte einem procuratormone-tae, der dem Ritterstand angehörte. Die Münzstätte selbst war in mehrere Abteilungen, officinae, aufgegliedert. Leiter des technischen Betriebs der Münzstätte war vermutlich der optio et exactorauriargenti et aeris. Die aus kaiserlichen Freigelassenen und Sklaven zusammengesetzten Spezialisten bildeten die sogenannte familiamone-talis. Eine Reihe von Handwerkerkategorien sind bekannt, so die Stempelschneider, scalptores, die Vorleger der Schrötlinge, suppostores, und die Zuschläger, die malleatores“ (Christ 1967: 73 f.).

Rom war die Hauptmünzstätte der Kaiserzeit für die Bronzeprägung. Hingegen wurde unter Kaiser Augustus ein Großteil der Edelmetallprägung außerhalb Roms hergestellt, wobei die östlichen Prägestätten, später auch die spanischen und Lugdunum, eine wichtige Rolle spielten. Seit Kaiser Caligula wurde die Münzproduktion aller drei Münzsorten auf Rom konzentriert, d. h. im Westen des Reiches gab es keine Prägung mehr. Unter Kaiser Nero wurde im Jahr 63/64 n. Chr. eine weitere Münzreform eingeleitet, die u. a. das kontinuierliche Absinken des Silbergehaltes in Denaren einleitete.

4. Anwendungsbeispiele für Röntgencomputertomographie an antiken Kupfermünzen

Die oben genannten Möglichkeiten der Röntgencomputertomographie werden im Folgenden an drei Beispielen aufgezeigt.

4.1 Sesterz des Tiberius

Der Sesterz des Tiberius wird auf das Jahr 22–23. n. Chr. datiert und der Münzstätte Rom zugeordnet. Auf dem Avers sind ein von zwei Maultieren nach rechts gezogener Prozessionswagen sowie die

Aufschrift „SPQR IVLIAE AVGVST“ (*senatus populusque romanus iuliae august* – „Senat und Volk von Rom zu Julia Augusta“) abgebildet, welche einen Bezug zum Dankesfest anlässlich der Genesung von Kaiserin Livia herstellt. Auf dem Revers befindet sich ein großes „S C“ (*senatus consultum* – „auf Senatsbeschluss hin“). Nach Mattingly und Sydenham (1923) wird der Sesterz als RIC 51 katalogisiert.

Wie in Abbildung 2 zu erkennen, weist die Münze starke Verwitterungsspuren auf. Der Sesterz hat eine Masse von 23,19 Gramm und weist eine Dichte von $7500 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ auf.



Abbildung 2: Vorder- und Rückseite des Sesterzes des Tiberius (Nr. 181, RIC 51) aus der Sammlung des Herzog Anton Ulrich-Museums Braunschweig

Durch qualitative Phasenanalyse mittels Röntgenbeugung konnten folgende Minerale in der Verwitterungskruste bestimmt werden: Kupfer (Cu), Cuprit (Cu_2O), Tenorit (CuO), Malachit ($\text{Cu}_2[(\text{OH})_2|\text{CO}_3]$), Smithsonit (ZnCO_3) und Quarz (SiO_2) sowie eine nicht sicher identifizierte Phase, welche vermutlich Moolooit ($\text{CuC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) entspricht.

Durch frühere Metallanalysen von Riederer (2006: 32) wurde folgende chemische Zusammensetzung ermittelt: Cu (86,75%), Zn (13,08%), Fe (0,12%), Pb (0,04%), Sb (<0,02%), Ag (0,01%) und Ni (0,01%). Hierbei fiel auf, dass im Vergleich zu ähnlichen Objekten der Sesterz zinkarm ist, jedoch die übrigen Elementsignaturen passend erscheinen, sodass gegen die Echtheit keine Einwände bestanden.

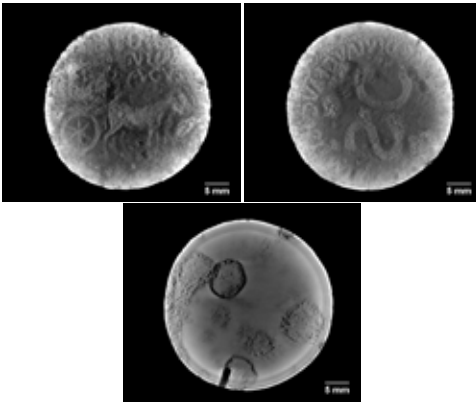


Abbildung 3 a-c: 3D- μ XRCT-Maximumprojektionen des Sesterz des Tiberius aus der Braunschweiger Sammlung: Avers (a), Revers (b), Münzmitte mit Bohrloch früherer Untersuchung (unten links) und Zinkverarmung (c)

Messparameter: 200 kV/ 40 μ A; 1024 Pixel Detektorgroße; 800 Winkelschritte; 0,5 mm Cu zur Aufhärtung; 48,3 μ m Voxellängenangabe

Wie aus Abbildung 3c ersichtlich wird, fand die Probenentnahme der Metallanalyse von Riederer in einem Bereich des Objektes statt, der, wie die Grauwertverteilung deutlich macht, bezüglich der Zusammensetzung und Homogenität nicht repräsentativ war. Somit müssen die vorliegenden Ergebnisse neu bewertet werden. Mit der 3D- μ XRCT wird die Möglichkeit eröffnet, Volumeninformationen zu generieren, die Aussagen zur inneren Beschaffenheit der Münzen zulassen. Im vorliegenden Fall existieren Hohlräume sowie zinkverarmte Gebiete im Inneren der Münze. Diese Befundlage wird auch durch die experimentell bestimmte Dichte gestützt, da sich nach den Analysenergebnissen von Riederer ein theoretischer Wert von $8758 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ ergibt. Die Abbildungen 3a und 3b sowie 4 zeigen einerseits sehr deutlich die Verwitterungspuren an der Oberfläche und andererseits, dass die Hohlräume direkt unter der Patina sitzen. Demnach findet die Zinkverarmung nicht nur oberflächlich an erhabenen Stellen statt, sondern insbesondere im Münzinneren als Lochfraß.

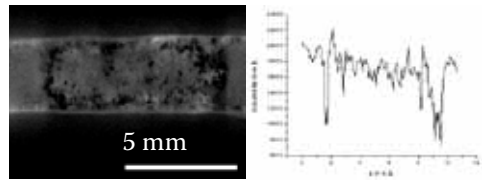


Abbildung 4: 2D-Schnittbild des Sesterz des Tiberius aus der Braunschweiger Sammlung: Querschnitt durch den linken oberen Inhomogenitätsbereich (vgl. Abb. 3c) aus 3D- μ XRCT-Messung (a) und zugehöriges Grauwertprofil (b)

4.2 Dupondius des Augustus

Der Dupondius des Augustus wird auf die Zeitspanne 10 v. Chr. bis 10 n. Chr. datiert und der Münzprägestätte Nemausus zugeordnet. Auf dem Avers sind der Kopf des Augustus mit Lorbeerkranz nach rechts und der Kopf des Agrippa mit Schiffskrone nach links sowie im oberen Bereich der Schriftzug „IMP“ und im unteren „DIVI F“ abgebildet. Auf dem Revers ist ein an einen Palmenbaum nach rechts blickendes Krokodil zu sehen, darüber befindet sich der Schriftzug „COL – NEM“ sowie ein Kranz mit Bändern. Nach Mattingly und Sydenham (1923) wird der Dupondius als RIC 158 katalogisiert.

Wie in Abbildung 5 zu erkennen, weist die Münze eine typische Messingfarbe sowie braun-grüne Patina auf. Der Dupondius hat eine Masse von 11,83 Gramm und weist eine Dichte von $8296 \pm 4 \text{ kg m}^{-3}$ auf.



Abbildung 5: Vorder- und Rückseite des Dupondius des Augustus (Nr. 1981/1254, RIC 158) aus der Sondersammlung der Universitätsbibliothek Leipzig

Die chemische Analyse mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie ergibt folgende Zusammensetzung: Cu (67,6%), Sn (16,7%), Pb (13,7%), Sb (1,3%), Fe (0,3%), Ag (0,3%), Hg (0,1%), Zn (0,05%). Demnach handelt es sich um eine Bleibronze.

Erst durch die Schnittprojektionen der 3D- μ XRCT können entsprechende Inhomogenitäten und Volumendefekte visualisiert werden (Abbildung 6 a–d). Deutlich erkennbar sind Risse, ein Dichtegradient, welcher der unterschiedlichen Dicke der Münze geschuldet ist, sowie in ersten Ansätzen weitere Hohlräume im Münzinne- ren sowie die Hohlraumverteilung, die mittels Hohlraumanalyse bestimmt wurde und hier nach Größe farbig ausgegeben wird.

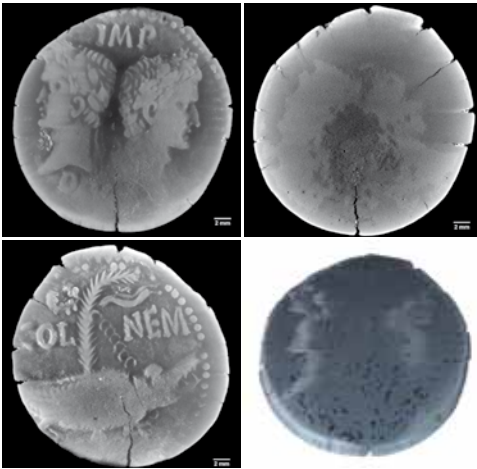


Abbildung 6 a–d: 3D- μ XRCT-Maximumprojektionen des Dupondius des Augustus aus der Sondersammlung der Universitätsbibliothek Leipzig (Nr. 1981/1254, RIC 158): Avers (a), Münzmitte (b), Revers (c) und Porenverteilung aus Defektanalyse (d)

Messparameter: 200 kV/ 150 μ A; 2048 Pixel Detektorgröße; 1600 Winkelschritte; 1 mm Cu zur Aufhärtung; 17 μ m Voxelkantenlänge

Mittels Hohlraumanalysen unter Nutzung des VGStudioMAX 2.0-Softwarepakets wurde in ersten Rechnungen ein Münzvolumen von 1,517 cm³ ermittelt; daraus errechnet sich eine Dichte von 7798 kg m⁻³, die um 498 kg m⁻³ unter der gemessenen liegt. Demzufolge existieren Hohlräume von 0,1 cm³, die mit der Software nicht detektiert werden konnten.

4.3 Unbestimmte Bronze

Die Visualisierungsmöglichkeiten mittels 3D- μ XRCT bieten die Chance, bislang unbestimmte Stücke zu identifizieren, insbesondere wenn eine starke Verwitterung vorliegt. So konnte die bislang nicht iden-

tifizierte Bronze (Abbildung 7a) unter Hinzuziehen der Schnittprojektionen (Abbildung 7b) als Maiorina des Theodosius I. aus der Münzstätte Constantinopolis der Zeit 379 bis 383 n. Chr. bestimmt werden; nach Pearce (1972) als RIC 52c katalogisiert.

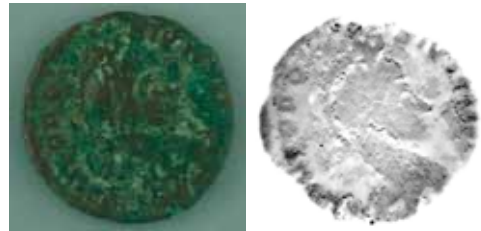


Abbildung 7 a–b: Avers der Maiorina des Theodosius I. aus der Sondersammlung der Universitätsbibliothek Leipzig: Foto (a) und 3D- μ XRCT-Maximumprojektionen (b)

Messparameter: 200 kV/ 40 μ A; 1024 Pixel Detektorgröße; 800 Winkelschritte; 1 mm Cu zur Aufhärtung; 38 μ m Voxelkantenlänge

5. Resümee und Ausblick

Mit der 3D- μ XRCT steht eine bildgebende Technik zur Verfügung, die als sinnvolle Ergänzung zu den oberflächensensitiven zerstörungsfreien Analyseverfahren betrachtet werden muss. Es konnte gezeigt werden, dass die Visualisierung und 3D-Rekonstruktion sowohl Volumeninformationen liefert, als auch Beiträge zur Identifikation ermöglicht. Darüber hinaus wird es möglich, entsprechende Entmischungssowie Korrosionsprozesse nicht nur an der Oberfläche zu beschreiben und zu detektieren, sondern im ganzen Objekt.

Die archäometrischen Studien greifen zudem den jüngst durch den Wissenschaftsrat bestärkten Gedanken auf, dass wissenschaftliche Sammlungen zur Forschungsinfrastruktur gehören, deren Potential durch die unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen genutzt werden sollte. Anhand materialwissenschaftlicher Untersuchungen können die Objekte in einen neuen Fokus gerückt werden, wobei bisher getätigte numismatische oder konservatorische Aussagen gestützt oder widerlegt werden können.

Danksagung

Die hier in Ausschnitten präsentierten Ergebnisse basieren auf verschiedenen Analysen, Messungen und Diskussion, welche nicht ohne die Unterstützung von Dr. Alexandra Franz, Dr. Martin Ende, André Eilert, Professor Dr. Klaus Bente und Professor Dr. Gert Klöß entstanden wären. Darüber hinaus gilt mein Dank Professor Dr. Wolfgang Leschhorn vom Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig sowie Dr. Christoph Mackert und Ewald Hausmann von der Universitätsbibliothek Leipzig.

Literaturverzeichnis

- Brandmüller, Torsten. *Schematische Darstellung des Röntgencomputertomographie-Aufbaus*. URL: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/3D_Computed_Tomography.png [Stand 2013-05-12].
- Caley, Earle R. 1949. Klaproth as a pioneer in the chemical investigation of antiquities. *J. Chem. Educ.* 26(5), 242–247, 268.
- Christ, Karl 1967. *Antike Numismatik. Einführung und Bibliographie*. Darmstadt: Wissenschaftl. Buchges.
- Franz, Alexandra, Bente, Klaus & Hanke, Randolph 2010. *Die Helix-CT: Eine neue Methode in der archäometrischen Forschung*, 31–32. in Deutsche Mineralogische Gesellschaft 2010. URL: http://www.dmg-home.de/Abstracts/DMG2010_Abstracts.pdf [Stand 2013-05-12].
- Hauptmann, Andreas 2008. Vom Erz zum Metall - naturwissenschaftliche Untersuchungen innerhalb der Metallurgiekette, in Hauptmann, Andreas & Pingel, Volker (Hg.): *Archäometrie : Methoden und Anwendungsbeispiele naturwissenschaftlicher Verfahren in der Archäologie; mit ... 7 Tabellen*. Stuttgart: Schweizerbart. (Veröffentlichung aus dem Deutschen Bergbaumuseum Bochum), 125–140.
- Hess, K.-U, u.a. 2011. Advances in high-resolution neutron computed tomography: Adapted to the earth sciences. *Geosphere* 7(6), 1294–1302.
- Kalender, Willi A 2006. Computertomographie. Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen. 2. Aufl. Erlangen: Publicis.
- Kent, John 1973. *Die römische Münze*. München: Hirmer.
- Linden, Veerle, u.a. 2010. Analysis of micro computed tomography images; a look inside historic enamelled metal objects. *Appl. Phys. A* 98(2), 385–392.
- Mattingly, Harold & Sydenham, Angela 1923. *The Roman imperial coinage: 1, Augustus to Vitellius*. London: Spink.
- Mattingly, Harold & Sydenham, Angela 1972. *The Roman imperial coinage: 9, Valentinian I - Theodosius I*. Repr. London: Spink.
- Radnoti-Alföldi, Maria 1978. *Antike Numismatik*. Mainz a. Rh: von Zabern. (Kulturgeschichte der antiken Welt).
- Rehren, Thilo & Pernicka, Ernst 2008. Coins, artefacts and isotopes - Archaeometallurgy and archaeometry. *Archaeometry* 50(2), 232–248.
- Riederer, Josef 2006. Die Metallanalyse römischer Münzen aus Kupferlegierungen des Herzog Anton Ulrich-Museums in Braunschweig, in Leschhorn, Wolfgang (Hg.): *Die römischen Münzen*. Braunschweig: Herzog Anton Ulrich-Museum, 31–39.
- Trojanowicz, Marek 2008. Modern chemical analysis in archaeometry. *Anal Bioanal Chem* 391(3), 915–918.
- Young, Marcus L. 2012. Archaeometallurgy using synchrotron radiation: a review. *Rep. Prog. Phys.* 75(3), 36504.